

Antti Visakova

**PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISTEKNIIKAT JA NIIDEN SOPIVUUS  
PIENPOLTTOlaitoksiin**

# **PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISTEKNIIKAT JA NIIDEN SOPIVUUS PIENPOLTTOLAITOKSIIN**

Antti Visakova  
Opinnäytetyö  
Kevät 2015  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka, energiatekniikka

---

Tekijä: Antti Visakova

Opinnäytetyön nimi: Päästöjen vähentämistekniikat ja niiden sopivuus pienpolttolaitoksiin

Työn ohjaaja: Jukka Ylikunnari, OAMK

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2015 Sivumäärä: 42 + 1 liite

---

Opinnäytetyössä selvitettiin parhaiten soveltuvat hiukkassuodatustekniikat puun pienpolton pienhiukkaspäästöjen vähentämiseen omakotitalokoluokassa. Pienpoltossa puu palaa tavallisesti epätäydellisesti, minkä vuoksi pienhiukkaspäästöt ovat suuria. Pienhiukkaset aiheuttavat terveydelle haitallisia vaikutuksia, jos ihmiset altistuvat niille. Puun pienpoltto tulee lisääntymään lähivuosina, koska Suomi on sitoutunut lisäämään uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetun energian osuutta. Puun pienpoltto on suurin pienhiukkasten aiheuttaja Suomessa. Pienhiukkaspäästöjä aiotaan rajoittaa lainsäädännöllisesti lähitulevaisuudessa. Hiukkassuodatustekniikoihin joudutaan turvautumaan, jos pienhiukkaspäästöjä ei saada vähennettyä vaaditulle tasolle polttoteknisin keinoin.

Kirjallisuustutkimuksena toteutetussa työssä tutustuttiin puun pienpolttoon Suomessa, poltosta aiheutuviin pienhiukkaspäästöihin ja hiukkassuodatustekniikoihin. Työssä selvitettiin pienpolttoon soveltuvimmat hiukkassuodatustekniikat. Tiedon hankinnassa käytiin läpi aihealueen kirjallisuutta, lehtiä sekä internetin tietolähteitä.

Puun pienpolttoon soveltuvien hiukkassuodattimien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat niiden halpuus, pieni koko, helppokäyttöisyys, kestävyys, luotettavuus, pieni paineistus, yksinkertainen rakenne, puhdistettavuus ja hyvä hiukkasten erotuskyky. Pienpolttoon parhaiten soveltuvat hiukkassuodatustekniikat ovat sähkösuodatin, lämmönvaihdin ja katalysaattori. Pienpolttolaitteisiin tarkoitettuja hiukkassuodattimia on jo runsaasti käytössä ulkomailla, mutta Suomessa niitä on hyödynnetty erittäin vähän. Puun pienpolton pienhiukkaspäästöjen tuleva sääntely lainsäädännöllisin keinoin saattaa kuitenkin muuttaa tilannetta Suomessa.

---

Asiasanat: puun pienpoltto, pienhiukkaspäästöt, hiukkassuodatustekniikat

## ALKULAUSE

Tämän opinnäytetyön tilaajana oli Oulun yliopiston Oulun Eteläisen instituutin tulevaisuuden tuotantoteknologian (FMT) tutkimusryhmä. Työn tilaajan yhdyshenkilönä toimi tutkimusjohtaja Kari Mäntyjärvi. Opinnäytetyön ohjaajana toimi energiatekniikan lehtori Jukka Ylikunnari. Kielen ohjauksesta vastasi lehtori Tuija Juntunen. Haluan kiittää edellä mainittuja ja kaikkia muita, joilta olen saanut apua ja neuvoja työn tekemiseen.

Oulussa 5.5.2015

Antti Visakova

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 PUUN PIENPOLTTO	7
2.1 Puupolttoaineet pienpoltossa	7
2.1.1 Polttopuut	7
2.1.2 Hake	8
2.1.3 Puupelletti	9
2.1.4 Puubriketti	10
2.2 Panospolttolaitteet	11
2.2.1 Varaavat tulisijat	11
2.2.2 Kiukaat	13
2.2.3 Avotakat ja kamiinat	13
2.2.4 Kattilat	14
2.3 Jatkuvat toimiset polttolaitteet	17
2.3.1 Pellettipoltin	17
2.3.2 Stokeripoltin	18
3 PIENPOLTON PIENHIUKKASPÄÄSTÖT	19
4 HIUKKASSUODATUSTEKNIIKAT	23
4.1 Kuitusuodatin	23
4.2 Sähkösuodatin	24
4.3 Hiukkaspesuri	27
4.4 Sykloni	29
4.5 Lämmönvaihdin	30
4.6 Katalysaattori	33
5 PIENPOLTTOON SOVELTUVIMMAT HIUKKASSUODATTIMET	34
6 YHTEENVETO	36
LÄHTEET	38
LIITTEET	
Liite 1 Lähtötietomuistio	

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää kirjallisuustutkimuksen avulla ne hiukkassuodatustekniikat, jotka soveltuvat parhaiten pienpolton pienhiukkaspäästöjen vähennykseen omakotitalokokoluokassa. Työssä tarkastellaan yleisellä tasolla suomalaista puun pienpolttoa ja poltosta aiheutuvien savukaasujen pienhiukkaspäästöjä. Työssä tutustutaan savukaasujen pienhiukkaspäästöjen sekundäärisiin puhdistusmenetelmiin eli hiukkassuodatustekniikoihin ja tutkitaan niiden sopivuutta pienpolttoon. (Liite 1.)

Puun pienpoltto on hyvin merkittävä pienhiukkaspäästöjen lähde Suomessa. Pienhiukkaset aiheuttavat ihmisille useita haitallisia terveysvaikutuksia. Puuenergian halpuus ja Suomen sitoutuminen uusiutuvien energiamuotojen lisäämiseen kasvattavat entisestään hiilidioksidineutraalien puupolttoaineiden käyttöä myös pienpoltossa. (1, linkki 2.1 Yleistä.) Pienpolttolaitteisiin tarkoitettujen hiukkaspuhdistimien arvellaan yleistyvän lähitulevaisuudessa muun muassa kiristyvien päästörajojen vuoksi (1, linkki 2.5 Päästöjen vähentäminen).

Tämän opinnäytetyön tilaaja on Oulun yliopiston Oulun Eteläisen instituutin tulevaisuuden tuotantoteknologian (FMT) tutkimusryhmä. FMT-ryhmä on Oulun yliopiston Nivalassa toimivan alueyksikön, Oulun Eteläisen instituutin sekä Oulun yliopiston tuotantotekniikan laboratorion yhteinen tutkimusryhmä. (2.)

## 2 PUUN PIENPOLTTO

Puun pienpoltolla tarkoitetaan yleensä puupolttoaineen polttoa kattilassa tai tulisijassa, jonka lämpöteho on alle 300 kW. Yksittäisessä asuintalossa tai rivitaloasunnossa käytettävien pienlämmittimien tehot ovat yleensä alle 30 kW. (3, s. 7.) Melkein jokaisessa suomalaisessa pientalossa ja kesämökissä on tulisija. Eräiden arvioiden mukaan Suomessa on kaiken kaikkiaan noin 3,7 miljoonaa pienpolttolaitetta. Uusiin omakotitaloihin asennetaan lähes poikkeuksetta vähintään yksi tulisija. Uudet tulevat energiamääräykset mahdollistavat tulisijan käytön ainoana varsinaisena lämpöenergiälähteenä niin sanotuissa matalaenergiataloissa. (1, linkki 2.1 Yleistä.)

Puu on hiilidioksidineutraali polttoaine eikä poltettuna lisää hiilidioksidin määrää ilmakehässä, toisin kuin esimerkiksi fossiiliset kivihiili ja öljy. EU-tasolla uusiutuvien energiamuotojen käyttöä lisätään lähivuosina merkittävästi. Suomi on sitoutunut lisäämään uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetun energian osuuden 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Lisäys tullaan pääosin toteuttamaan metsähakkeen käytön lisäämisellä. (1, linkki 2.1 Yleistä.)

### 2.1 Puupolttoaineet pienpoltossa

Puu on uusiutuva, kotimainen ja taloudellinen energialähde. Puuta on maassamme runsaasti saatavilla, ja se on todellista uusiutuvaa bioenergiaa. Lämmön lähteenä puu on ympäristöystävällinen, sillä se ei lisää kasvihuonekaasuja. Puu palaa joka tapauksessa, niin hitaasti lahotessaan kuin nopeasti palaessaankin. Palaessaan se vapauttaa ilmakehään hiilidioksidia. Kasvavat puut sitovat tämän vapautuvan hiilidioksidin, joten sen määrä ilmakehässä ei lisäännä toisin kuin fossiilisia polttoaineita käytettäessä. (4, s. 5.)

#### 2.1.1 Polttopuut

Puuta poltetaan halkoina tai klapeina esimerkiksi pientalojen tulisijoissa, saunoissa, mautiloilla ja muissa kiinteistöissä. Kotitalouskäyttöön tarkoitettu puu on kuivattava ennen käyttöä. Tulisijassa poltettavan puun sopiva kosteusprosentti on 15–20 %. Polttopuun laadulla on merkittävä vaikutus puusta saatavaan

energiamäärään, poltosta syntyviin päästöihin ja turvallisuuteen. Kun käytetään puhdasta kuivaa puuta, vältetään turhia hiukkaspäästöjä. Sytytystavalla ja polton aikaisella ilman säätelyllä on myös vaikutusta palamisen puhtauteen. (5, linkki Polttopuut.)

Halko on metrin pituista halkaistua tai kuorittua polttopuuta, joka soveltuu pääosin keskuslämmityskattilan tai leivinuunin polttoaineeksi. Tulipesissä, kuten uuneissa, takoissa, helloissa ja kiukaissa, käytetään yleensä haloista pienittyä puuta, jolla on monta nimeä: klapi, pilke, hellapuu, uunipuu. Tällaisen polttopuun pituus on tavallisesti 25 senttiä tai 33 senttiä riippuen siitä, onko metrin halko katkottu neljään vai kolmeen osaan. (Kuva 1.) (5, linkki Polttopuut.)



*KUVA 1. Polttopuita (5, linkki Polttopuut)*

### **2.1.2 Hake**

Hakkeella tarkoitetaan hakkurilla koneellisesti haketettua puuta. Sitä tehdään karsitusta tai karsimattomasta kokopuusta, hakkuutähteistä, kannoista tai muusta puujätteestä. Valtavan energia-arvon hakkeesta saa valjastettua käyttöön kuivana ja oikein poltettuna. Se on kiistatta yksi edullisimmista tavoista lämmitellä. Hake mahdollistaa puulämmityksen täydellisen automatisoinnin. Käytännössä kaikki nykyaikaiset, oikein suunnitellut, automatisoidut ja huolletut hake-  
lämmitykset, joissa käytetään laadukasta polttoainetta, ovat yhtä helppoja ja



huolettomia kuin vanhanaikainen öljylämmitys. Hakkeen käyttö polttoaineena on erittäin merkittävästi kasvanut lämmitysmuoto Suomessa. (6, linkki Hake.)

Hyvälaatuinen hake määritellään kolmella kriteerillä: hakkeen kosteusarvo, laadun tasaisuus sekä palojen koko. Näistä tekijöistä muodostuu hakkeen yleislaatu. Hakkeen kosteusprosentti vaikuttaa puusta saadun lämpöenergian määrään. Jotta hake voidaan määritellä hyvälaatuiseksi, sen kosteuden tulee olla alle 30 %. Tasainen hakelaatu ja oikea palakoko takaavat lämmityslaitteiden luotettavan ja häiriöttömän toimivuuden (kuva 2). Sopiva hakkeen palakoko vaihtelee välillä 5–50 mm. Mitä enemmän runkopuuta haketettava raaka-ainepuu sisältää, sitä tasaisemman laadun ja palakoon hakkeelle pystyy saavuttamaan. (6, linkit Hake -> Laatu.)



*KUVA 2. Tasalaatuista haketta (6, linkit Hake -> Laatu)*

### **2.1.3 Puupelletti**

Pelletti on kotimaista, uusiutuvaa bioenergiaa tehokkaassa muodossa. Polttoaineena se on kuivaa, pölytöntä, hajutonta, tasalaatuista ja helposti käsiteltävää. Pelletin lämpöarvo on erinomainen. Parhaimmillaan pellettilämmitys on yhtä vaivatonta kuin vanhanaikainen öljylämmitys. Hinnaltaan se on noin puolet halvempi lämmitysmuoto. (6, linkki Pelletti.)

Puupelletit (kuva 3) valmistetaan pääsääntöisesti teollisuuden sivutuotteena syntyneestä kutterinpurusta, hiontapölystä tai sahanpurusta. Raaka-aine puristetaan sylinterin muotoiseksi rakeeksi hydraulisesti pakottamalla. Sidosaineena toimii puun oma luonnollinen liima-aine, ligniini. Pelletti on kuivaa puuta, jonka

kosteusprosentti on alle 10 %. Näin ollen se ei jäädy eikä homehdu. Puupelletin läpimitta on 6–12 mm ja pituus 10–30 mm. (6, linkki Pelletti.)



*KUVA 3. Puupellettejä (6, linkki Pelletti)*

#### **2.1.4 Puubriketti**

Puubriketit (kuva 4) valmistetaan pelletin tapaan puusepänteollisuuden sivutuotteista, höylän lastuista ja sahanpurusta, jotka puristetaan hydraulisesti tiiviiksi paloiksi. Puun oma luonnollinen liima-aine, ligniini, sitoo puubriketin tiiviiksi. Briketti muistuttaa ulkoisesti pellettiä, mutta on kooltaan huomattavan paljon suurempaa. Puubriketin kosteusprosentti on noin 7 %. Poikkileikkaukseltaan pyöreän tai neliön muotoisen briketin halkaisija on yleensä 50 mm ja pituus 50–150 mm. Halkojen ja klapien tavoin brikettejä voidaan polttaa kaikissa kotitalouksien tulisijoissa. Jollei taajamassa ole mahdollisuutta saada polttopuuta tai sen käyttö on haasteellista, on briketti hyvä ratkaisu tulisijan lämmönlähteeksi. (6, linkki Briketti.)



*KUVA 4. Puubrikettejä (6, linkki Briketti)*

## **2.2 Panospolttolaitteet**

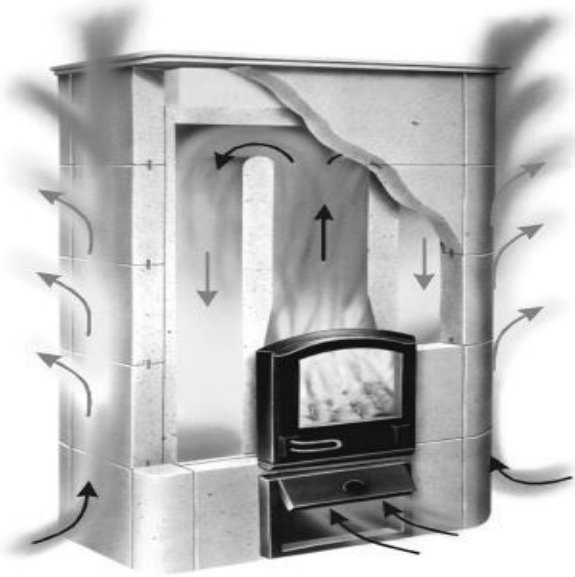
Panospoltossa tulipesään laitetaan kerralla polttoaine-erä, joka sytytetään palamaan. Panoksen annetaan palaa loppuun ennen seuraavan panoksen lisäämistä tai esimerkiksi klapeja voidaan lisätä yksitellen. Panospoltossa palamisolosuhteet vaihtelevat palamisvaiheen mukaan. (1, linkki 4.1 Panospoltto.)

### **2.2.1 Varaavat tulisijat**

Varaavat tulisijat ovat yleisimpiä puun pienpolttoon käytettyjä polttolaitteita Suomessa. Varaavia tulisijoja ovat muun muassa moderni varaava takka, perinteinen varaava takka, leivinuuni ja liesi. Varaavan tulisijan toiminta perustuu puun polttamiseen lyhyessä ajassa suurella teholla, jolloin vapautuva lämpöenergia varastoituu tulisijan varaavaan massaan. Varaavia tulisijoja voidaan käyttää lämmitykseen ja ruuanlaittoon. Varaavissa tulisijoissa poltetaan yleensä klapeja. Varaaviin takkoihin voidaan käyttää myös puupellettejä pellettikorien avulla. (1, linkki 4.1.1 Varaavat tulisijat.)

Varaavat tulisijat toimivat vastavirtaperiaatteella. Polttoaine palaa tulipesässä. Savukaasut nousevat tyypillisesti yläpalotilaan ja sieltä savukanavia pitkin tulisijan alaosaan ja poistuvat savupiippuun. Varaavat tulisijat ovat rakenteeltaan massiivisia. Tulipesän ympärillä on paljon varaavaa massaa, joka varaa lämpöä mahdollisimman hyvin ja luovuttaa sitä mahdollisimman pitkään. Valmistusmateriaaleina käytetään tiiltä, vuolukiveä, keraamista tai muuta hyvin lämpöä varaavaa materiaalia. (1, linkki 4.1.1 Varaavat tulisijat.)

Suomessa yleisin tulisija on varaava takka (kuva 5), jossa on rakoarina. Moderneissa varaavissa takoissa käytetään myös uusia arina- ja palamisilman syöttöratkaisuja, joilla päästöjä on voitu huomattavasti pienentää. Varaavassa takassa on suora tulipesä, josta palokaasut kulkeutuvat yläpalokammioon ja laskeutuvat sieltä alas takan jalustaan, jolloin lämpöä siirtyy rungon massaan. Varaavan takan lämmön varauskyky on hyvä ja se luovuttaa lämpöä tasaisesti huoneeseen jopa vuorokauden ajan peltien sulkemisen jälkeen. (3, s. 10.)



*KUVA 5. Varaava takka (7, s. 116)*

Leivinuunia käytetään lämmitykseen ja ruoanlaittoon. Liettä käytetään ensisijaisesti ruuanvalmistukseen. Saatavilla on myös yhdistelmätulisiijoja, joissa on liesitaso ja pieni leivinuuni (kuva 6). Leivinuunissa tulipesä on vaakasuorassa, joten nopeasti nousevaa savukaasujen alkuvirtausta ei synny. Uunissa ei ole rakoarinaa ja ilman johtaminen palamisprosessiin on hankalaa. Lämpö varautuu uunin suureen kivimassaan. Leivinuunissa poltto tapahtuu panospolton periaatteella polttamalla 2–3 pesällistä puita, minkä jälkeen hiillos poltetaan loppuun. Liedessä polttotapahtuma on yleensä jatkuvaa, sillä puuta lisätään käytön aikana tulipesään vähäisiä määriä. (3, s. 11.)



*KUVA 6. Liesi-leivinuuni yhdistelmä (8, s. 21)*

### 2.2.2 Kiukaat

Saunankiukaat ovat Suomessa hyvin yleisiä tulisijoja. Kiukaista halutaan saada ulos mahdollisimman kova hetkellinen teho, jotta kivet ja sauna saadaan lämpimäksi, vaikka se ei päästöjen kannalta olekaan edullista. Kiukaissa lämpö varautuu kiuaskiviin. Tulipesä on suhteellisen pieni. Yleensä kiukaissa käytetään ainoastaan ensiöilmaa arinalta ja luukusta. Kiukaan vaippa on yleensä terästä, mutta kiukaita valmistetaan myös esimerkiksi tiilestä ja vuolukivestä. (1, linkki 4.1.2 Kiukaat.) Puulämmitteiset kiukaat voidaan jakaa savukiukaisiin, kertalämmitteisiin ja jatkuvalämmitteisiin kiukaisiin. Savukiukaat ja kertalämmitteiset kiukaat ovat varaavia, mutta yleisimmässä eli jatkuvalämmitteisessä kiukaassa (kuva 7) tulta pidetään yllä jatkuvasti. (3, s. 11.)



*KUVA 7. Jatkuvalämmitteisen puukiukaan lämmitys (8, s. 53)*

### 2.2.3 Avotakat ja kamiinat

Avotakat ovat yleisiä 1970-luvulla rakennetuissa taloissa. Niiden merkitys on yleensä sisustuksellinen ja viihtyisyyden lisääminen, eikä niitä enää nykyisin käytetä huonetilojen lämmittämiseen. Kamiinat ovat tavallisesti pieniä, kevyitä, metallisia tulisijoja, jotka lämmittävät suoraan huoneilmaa varaamatta lämpöä kamiinan rakenteisiin. Suuluukuton avotakka voidaan muuttaa osittain varaavaksi lämmittimeksi asentamalla siihen metallinen takkasydän (kuva 8). (3, s. 11.)



*KUVA 8. Avotakkaan asennettu takkasydän (9, s. 6)*

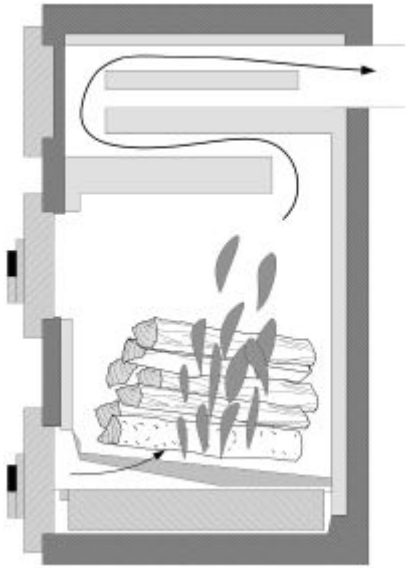
#### **2.2.4 Kattilat**

Kattiloita käytetään ensisijaisina lämmönlähteinä pientaloissa. Kattilalla tuotettu lämpöenergia siirretään yleensä joko veden tai ilman avulla käytettäväksi samassa kiinteistössä tai hyvin lähellä sijaitsevaan kohteeseen. Kattilan tuottamalla lämpöenergialla voidaan lämmittää patteriverkostossa kiertävää vettä ja/tai käyttövettä. Yleensä kattilaan liitetään varaaja hyötysuhteen parantamiseksi. (1, linkki 4.1.4 Klapikattilat; 3, s. 7.)

Kattilat voivat toimia omana yksikkönään tai niihin voi olla liitettynä pelletti tai stokeripoltin. Käsisyöttöiset klapikattilat tuottavat yleisesti ottaen suurempia savukaasupäästöjä kuin nykyaikaiset, puupelleteillä toimivat kattilat. Savukaasujen määrään ja laatuun vaikuttavat laitetyypin lisäksi oleellisesti polttoaineen laatu ja polttotapa sekä kattilan tekninen kunto ja huolto. (1, linkki 4.1.4 Klapikattilat; 3, s. 7.)

Yläpalokattila (kuva 9) on yleisin puupilkkeen polttoon tarkoitettu kattila Suomessa. Se muistuttaa toimintaperiaatteeltaan tulisijaa. Polttoaine laitetaan kattilaan isona pilkeannoksena, joka syttyy kerralla palamaan. Palamisilma ohjataan kattilan pohjalla olevan rakoarinan läpi ja kattilan luukkujen kautta. Yläpalokattilaan liitetään yleensä vesivaraaja, jonka koko on 1–5 m<sup>3</sup>. Riittävän suuren vesivaraajan kanssa kattilaa voidaan käyttää täydellä teholla, jolloin päästöt ovat

yleensä pienimmät, palaminen tehokkainta ja lämmitysaika jää muutamaan tuntiin vuorokaudessa. Varaajatonta kattilaa on pakko käyttää pienellä teholla eli niin sanotulla ”kitupoltolla”. Kitupoltossa palamisilman määrää rajoitetaan, jolloin palamiskaasut eivät pala kokonaan, mistä seuraa suuria savukaasu- ja hiukaspäästöjä. (1, linkki 4.1.4.1 Yläpalo-, alapalo- ja kaksoispesäkattilat; 3, s. 7–8.)



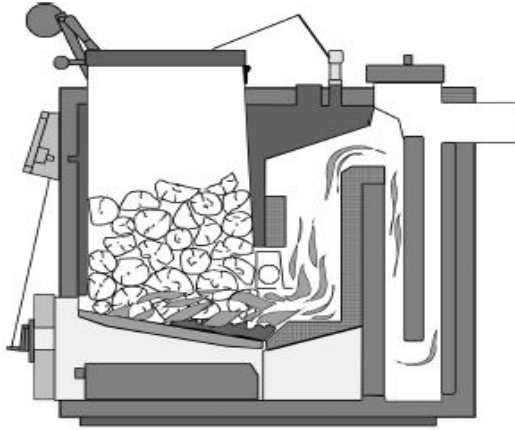
*KUVA 9. Yläpalokattila (7, s. 118)*

Kaksoispesäkattila on Suomessa yleinen kattilatyyppe. Se on yhdistelmäkattila, jossa on kaksi tulipesää. Toinen on tyypillisesti klapien polttamiseen tarkoitettu yläpalokattila ja toinen on tarkoitettu öljyn polttamiseen. Vanhimmissa kattiloissa pilkepesä on pieni ja se on tarkoitettu vain tilapäiseen käyttöön. Tällainen kattila ei sovellu pääasialliseen puulla lämmittämiseen ilman vesivaraajaa. Suurin syy savuhaittaa koskeviin valituksiin ovat vanhat kaksoispesäkattilat, joissa puuta poltetaan lähes jatkuvasti. (1, linkki 4.1.4.1 Yläpalo-, alapalo- ja kaksoispesäkattilat; 3, s. 8.)

Alapalokattilassa (kuva 10) palaminen tapahtuu kattilan alaosassa. Syntyvät kaasut ja liekit johdetaan erilliseen jälkipalotilaan loppupalamista varten. Näissä kattiloissa käytetään polttoaineena puupilkettä tai haketta. Alapalokattila toimii joko luonnonvedolla tai palamisilma johdetaan palavaan kerrokseen puhaltimen avulla. Palaminen on tehokkaampaa ja puhtaampaa kuin yläpalokattilassa, eikä

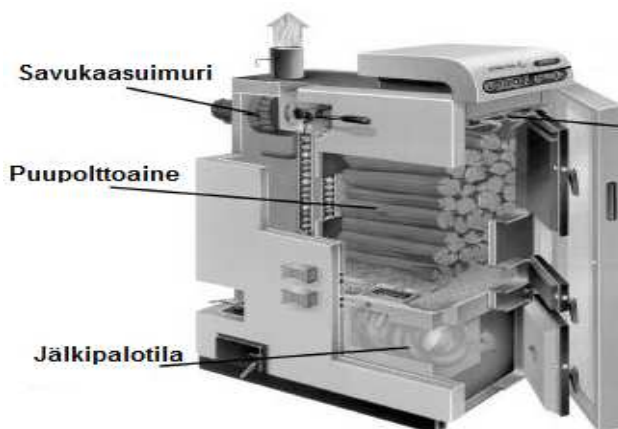


vesivaraajaa välttämättä tarvita, joskin sen käyttö on suositeltavaa. Alapalokattilat ovat huomattavasti kalliimpia kuin yläpalokattilat. (1, linkki 4.1.4.1 Yläpalo-, alapalo- ja kaksoispesäkattilat; 3, s. 8.)



*KUVA 10. Alapalokattila (7, s. 119)*

Käänteispalokattila (kuva 11) on uusin pienkattilatyyppejä, joka on kehitetty alapalokattilasta. Kehittyneen polttotekniikan ansiosta kattilan päästöt saadaan pidettyä hyvin alhaisina. Palamiskaasut johdetaan kattilan polttoainekerroksen alla olevan pienen arinan läpi keraamiseen jälkipalotilaan, jossa kaasut palavat korkeassa lämpötilassa. Käänteispalokattila tarvitsee yleensä savukaasujen poistoimurin. Useimmiten savukaasujen poistoimuri on kattilan rakenteessa. Maisissa, joissa on tiukkoja määräyksiä savukaasujen päästöille, käänteispalokattila on yleisimmin käytetty kattilatyyppejä. Korkean hintansa vuoksi ei ole juurikaan käytössä Suomessa. (1, linkki 4.1.4.2 Modernit kattilat; 3, s. 10.)



*KUVA 11. Käänteispalokattila (7, s. 120)*

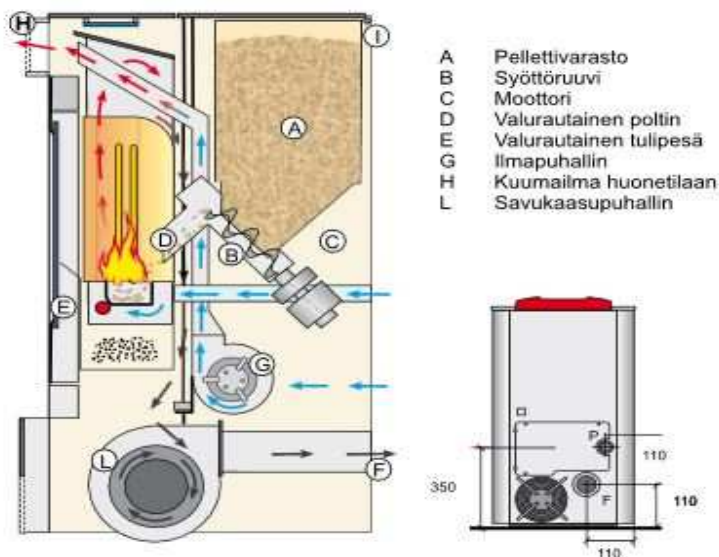


## 2.3 Jatkuvatoimiset polttolaitteet

Jatkuvasyöttöisessä poltossa polttoaineen palakoko on pieni ja polttoaineena käytetään tyypillisesti haketta tai pellettejä. Pienkiinteistöluokan polttimia ovat stokeripoltin ja pellettipoltin, jotka on kytketty kattilaan. Erityisesti pellettipolttimia on myös integroitu kattiloihin, jolloin puhutaan pellettikattiloista. Poltinpolttoon tarvittavia osia ovat ruuvisiirrin, poltin ja kattila tai tulipesä kaasujen palamista varten. Lisäksi on huomioitava, että polttoainetta varten tarvitaan tila polttoainesäiliölle. Päästöjen kannalta tärkeitä tekijöitä ovat polttimen oikea mitoitus ja varaajan mahdollinen käyttö. (1, linkki 4.2 Poltinpoltto.)

### 2.3.1 Pellettipoltin

Pellettipolttimia käytetään pellettikattiloissa ja pellettitakoissa. Pellettikattiloissa poltin ja kattilaosat voivat olla kiinteä laitekokonaisuus tai irrallisia osia. Irrallisia pellettipolttimia voidaan käyttää myös useimmissa kiinteille polttoaineille tarkoitetuissa kattiloissa sekä öljypolttimen kattilassa. Pellettikattiloilla palamisesta syntyvä lämpö käytetään veden lämmittämiseen. Pellettitakat (kuva 12) ovat pienemmän kokoluokan lämmityslaitteita ja ne lämmittävät huoneilmaa konvektiolla. Polttimissa käytetään polttoaineena pellettejä, joiden laatu on määritelty polttimen käyttöohjeessa. (1, linkki 4.2.1 Pellettipoltin)



KUVA 12. Pellettitakan leikkauskuva (8, s. 22)

Polttimet voidaan jakaa syöttötavan mukaan ylä-, ala- ja vaakasyöttöisiin sekä palamisperiaatteen mukaan kaasutus-, arina-, malja- ja putkipolttimiin. Polttoaine tuodaan polttimelle säiliöstä syöttöruuvilla avulla. Polttoaineen sytytys toimii automaattisesti joko sähköisesti sytytysvastuksen avulla tai pilot-liekillä. Poltinten teho säätyy portaattomasti tehontarpeen mukaisesti, tai termostaatti ohjaa poltinta, jolloin poltin toimii nimellisteholla ja sammuu kokonaan, kun lämmöntarve on saavutettu. Päästöt ovat yleensä pienimmillään polttimeen toimiessa nimellisteholla. (1, linkki 4.2.1 Pellettipoltin.)

### 2.3.2 Stokeripoltin

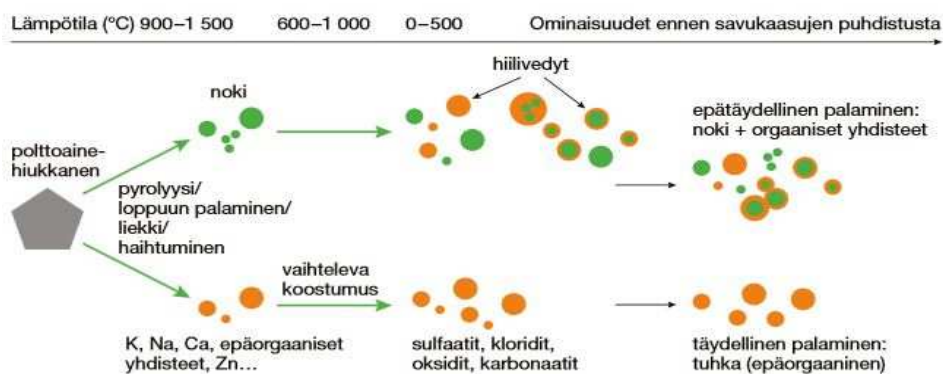
Stokeripoltin (kuva 13) toimii samalla periaatteella kuin vaakasyöttöinen pellettipoltin. Polttoaineena voidaan käyttää haketta ja pellettejä. Polttoaine syötetään vaakasuunnassa olevan kiinteän ruuvilla avulla palopäähän. Polttoaine palaa palopäässä pienellä arinalla. Poltinpää voi olla joko kokonaan kattilan tulipesän sisäpuolella tai osittain ulkopuolella, jolloin vain kaasut johdetaan tulipesään. Kaasut palavat tulipesässä. Stokeripoltinta pidetään käytännössä jatkuvasti päällä ja tehoa säädetään termostaatin avulla. Alimmalla tehoalueella ylläpidetään pilot-liekkiä, joka sytyttää polttoaineen tehoa nostettaessa. (1, linkki 4.2.2 Stokeripoltin.)



KUVA 13. Kattilaan kytketty stokeripoltin (7, s. 130)

### 3 PIENPOLTON PIENHIUKKASPÄÄSTÖT

Puun poltosta syntyvät pienhiukkaset muodostuvat puun epäorgaanisesta tuhka-aineksesta ja epätäydellisen palamisen lopputuotteista (kuva 14). Epätäydellisen palamisen haitalliset lopputuotteet koostuvat liekissä syntyvistä nokihiukkasista ja orgaanisista kaasuisista, jotka tiivistyvät tuhka- ja nokihiukkasten pinnalle. (10, s. 7.)



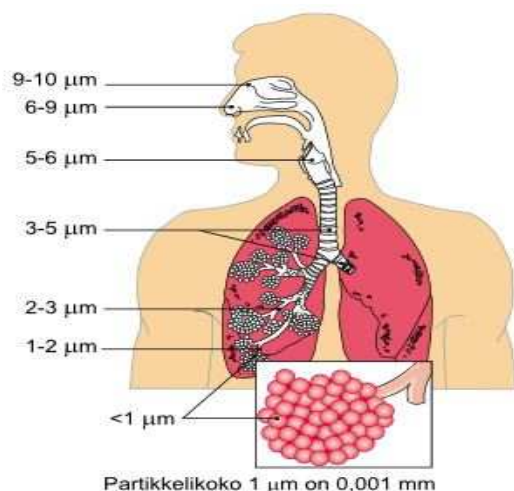
KUVA 14. Pienhiukkasten muodostuminen puun poltossa (11, s. 7)

Pienpoltossa puu palaa tavallisesti epätäydellisesti, minkä vuoksi hiukkaspäästöt ovat korkeita. Pienhiukkaset aiheuttavat kansanterveydellisiä vaikutuksia ihmisten altistuessa niille. Puun pienpoltossa päästökorkeus on verrattain matala, joten päästöt eivät leviä kovinkaan kauas lähteestä. Niinpä terveysvaikutukset jäävät enimmäkseen paikallisiksi. Tästä syystä samansuuruinen päästö aiheuttaa suuremman väestöaltistuksen alueilla, jossa väestötiheys on suurempi. Niinpä kaupungissa tapahtuva poltto saattaa olla kansanterveyden kannalta haitallisempaa kuin haja-asutusalueella tapahtuva, vaikka puunkäyttömäärä olisi pienempi. (12, s. 7.)

Puunpolton savut ovat merkittävimpiä ilmansaasteita pientaloalueilla. Talvipakkasella puunsavut jäävät usein leijumaan matalalle pihapiireihin, ja osa niistä kulkeutuu ilmanvaihdon kautta asuntojen sisätiloihin. Huonoista puunpolttotavoista saattaa aiheutua merkittäviä määriä pienhiukkasia myös suoraan asunnon sisäilmaan. Runsaasta pienpoltosta syntyvät korkeat pienhiukkasten vuorokausipitoisuudet voivat aiheuttaa vakavia oireita sydän- ja hengityssairaille sekä

lisätä pikkulasten hengityselinoireita ja -infektioita. Useita vuosia tai vuosikymmeniä kestävä altistuminen puunpolton savuille kohottaa kroonisiin sydän- ja hengityssairauksiin sairastumisen riskiä ja lisää ennenaikaisia kuolemia näitä pitkäaikaissairauksia sairastavien keskuudessa. Vaikutus on samanlainen kuin liikenteen pakokaasuilla ja tupakansavulla, joka muistuttaa koostumukseltaan huonon puunpolton savua. (13.)

Pienhiukkasilla tarkoitetaan läpimitaltaan alle  $2,5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) hiukkasia. Yksi  $\mu\text{m}$  on  $0,001\ \text{mm}$ . (8, s. 46.) Kaikkein pienimmät hiukkaset ( $\text{PM}_1$ , alle  $1\ \mu\text{m}$ ) ovat vaarallisimpia, koska ne pääsevät tunkeutumaan syvälle hengityselimistöön ja jopa verenkiertoon saakka (kuva 15). Nykyään puhutaankin yhä useammin  $\text{PM}_1$ :stä  $\text{PM}_{2,5}$ :n sijasta, kun tarkoitetaan pienhiukkasia. (14, s. 12.)



KUVA 15. Pienhiukkasten kulkeutuminen hengityselimistöön (8, s. 47)

Erityyppisten puuta käyttävien pienpolttolaitteiden päästöt vaihtelevat suuresti. Tehokkainta palaminen on jatkuvapolttolisissa laitteissa, kuten pellettikäyttöisissä polttimissa ja kattiloissa sekä hakestokereissa. Panospolttoon perustuvissa takoissa päästöt ovat edellä mainittuja suuremmat. Huonointa polttotekniikkaa edustavat kiukaat, kamiinat, liedet ja avotakat. (3, s. 13–14.) Kaikille EU:n jäsenvaltioissa myytävälle tehdasvalmisteisille tulisijoille on tullut pakolliseksi CE-merkintä, joka tuli voimaan 1.7.2013 rakennustuoteasetuksen myötä. Tulisijat täytyy tyyppitestata CE-merkintää varten riippumattomassa laboratorioissa. Laboratorioissa testataan muun muassa tulisijojen aiheuttamat päästöt. (15.)

Itse polttolaitteen lisäksi päästöihin vaikuttavat voimakkaasti myös polttotapa ja polttoaineen laatu. Huonoilla poltto-olosuhteilla ja kostealla puulla voi hyvinkin polttolaitteen päästöjä kasvattaa moninkertaisesti. Käyttäjän virheillä voi olla polttolaitetta suurempi merkitys syntyvien päästöjen kannalta. Esimerkiksi yläpalokattilan kitupoltossa on arvioitu syntyvän jopa 30-kertainen hiukkaspäästö tavanomaiseen pellettikattilaan verrattuna. (3, s. 14; 12, s. 7.)

Taulukossa 1 on esitetty Itä-Suomen yliopistossa mitattuja puun pienpolttolaitteiden PM<sub>1</sub>-hiukkaspäästöjä. Päästöt on ilmoitettu grammoina polttoainekiloa kohti. Taulukossa Suomen yleisimmät pienpolttolaitteet on ryhmitelty tyypeittäin. Kamiinat ja avotakat on jätetty tarkastelusta pois päästötietojen vähäisyyden vuoksi. Tuloksista voidaan nähdä, että jatkuvapolttoisten laitteiden päästöt ovat pienemmät kuin panospolttolaitteiden. Modernien panospolttolaitteiden päästöt ovat pienemmät kuin perinteisten. Kaikista suurimmat päästöt ovat saunan kiuksilla. (16, s. 7.)

*TAULUKKO 1. Pienpolttolaitteiden PM<sub>1</sub>-hiukkaspäästöjä (16, s. 8; 17, s. 65)*

Polttolaitetyyppi (polttoaine)		PM <sub>1</sub> g/kg <sub>pa</sub>
Pellettipolttimet ja kattilat		0,18 ; 0,28
Pelletti- ja stokeripolttimet, (peltobiomassat)		0,3–0,5
Pellettitakat		
Stokeripolttimet, (puupelletit)		0,19 ; 0,22
Stokeripolttimet, (puuhake)		0,24–0,35
Klapikattilat		1,0
Moderni polttolaitteet	varaavat	0,3–0,5 ; 0,7
Perinteiset polttolaitteet	varaavat	0,6–1,6 0,7 ; 0,7–0,8 1,9 ; 2,5–3,3
Liesi		0,5–1,2 , 0,9
Kiuas		2,7 ; 2,9 ; 5,0

Puun pienpoltto on suurin pienhiukkasten aiheuttaja Suomessa. Se on myös ainoita merkittäviä vielä toistaiseksi sääntelemättömiä päästölähteitä. Teollisuuden, energiantuotannon ja liikenteen laitteet ja toiminta ovat olleet päästölainsäädäntöjen alaisena jo pitkään. (10, s. 11.)

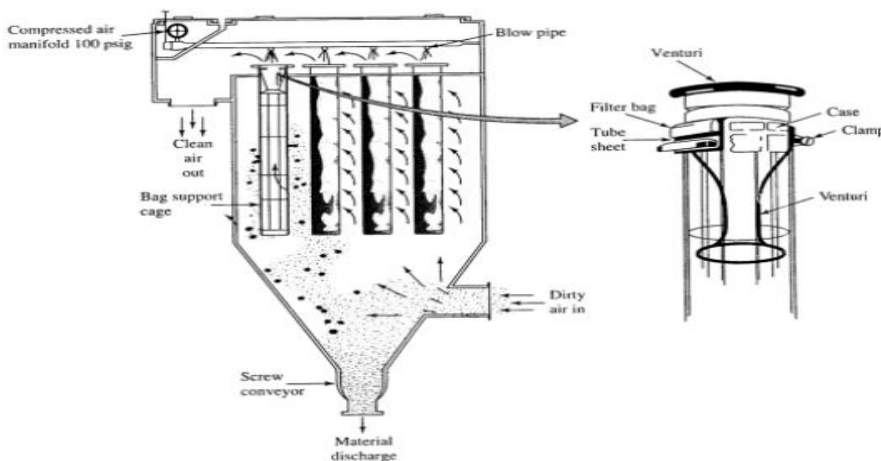
Tuore Ecodesign-direktiivi kiinteän polttoaineen pienkattiloille ja tulisijoille tulee olemaan ensimmäinen näiden laitteiden hiukkaspäästöjä rajoittava laki Suomessa. Ecodesign-direktiivin päästöjä vähentävä vaikutus on Suomessa melko hidas johtuen yleisimpien polttolaitteiden, varaavien tulisijojen pitkästä käytöstä ja laitekannan hitaasta uudistumisesta. Lisäksi direktiivi ei koske kaikkia merkittäviä polttolaitetyyppejä, kuten saunan puukiukaita, jotka ovat päästöjen kannalta merkittävin yksittäinen polttolaitetekategoria Suomessa. Ecodesign-direktiivin pienpolttolaitteita koskevat vaatimukset tulevat oletettavasti voimaan 2020-luvulla. (10, s. 7–11.)

## 4 HIUKKASSUODATUSTEKNIIKAT

Hiukkaspäästöihin voidaan vaikuttaa erilaisilla polttotekniikoilla ja -tavoilla sekä polttoaineilla eli primäärisin menetelmin. Sekundäärisillä savukaasujen puhdistusmenetelmillä eli hiukkassuodatustekniikoilla voidaan vähentää ilmakehään joutuvia päästöjä polttolaitteen jälkeen, ennen kuin savukaasut johdetaan savupiipun kautta ulkoilmaan. Hiukkassuodatustekniikoihin joudutaan turvautumaan, jos primäärisillä menetelmillä ei saada päästöjä vähennettyä vaaditulle tasolle. (14, s. 17.)

### 4.1 Kuitusuodatin

Kuitusuodattimessa pölypitoiset savukaasut puhdistetaan johtamalla ne kankaan läpi. Suodatinkankaat on valmistettu luonnonkuidusta, mineraalikuidusta tai synteettisestä kuidusta. Kankailla pystytään suodattamaan jopa 200–250 °C:n kaasuja. Letkusuodatin (kuva 16) on yleisin kuitusuodatintyyppi. Se on toisesta päästä avoin kangaspussi. Suodatinyksikössä olevien letkujen määrä riippuu suodatuksen tarpeesta. (18, s. 253.)



KUVA 16. Paineilmasysäyksellä puhdistettava letkusuodatinyksikkö (7, s. 328)

Pölypitoinen savukaasu johdetaan kankaan läpi, jolloin pöly erottuu savukaasuista kerrostuen letkun pinnalle. Kankaalle kerrostunut pöly parantaa osaltaan suodattimen erotusastetta. Suodatinkankaalle kertynyt pöly poistetaan joko mekaanisesti ravistamalla, paineilmasysäyksellä tai ultraäänen avulla. Lisäksi kan-

kaan voi puhdistaa huuhtelemalla sen puhtaalla ilmalla, joka virtaa päinvastaiseen suuntaan kuin puhdistettava savukaasu. Letkusuodattimien puhdistuksessa pöly putoaa letkujen alapuolella olevaan pohjasuppiloon, josta pöly syötetään säiliöön. (18, s. 253.)

Kuitusuodattimien erotusaste on yleensä lähes 100 % kaikenkokoisille hiukkasille. Laite suodattaa jopa 0,01  $\mu\text{m}$ :n hiukkasia. Kuitusuodattimen ongelmia ovat savukaasujen tarttuvuus ja hehkuvat partikkelit, kuluminen, painehäviöt ja laitteiston huollon tarve. Suodattimien letkut joudutaan yleensä uusimaan 2–3 vuoden välein, joten korkeiden lämpötilojen kalliista kuitumateriaaleista voi kertyä merkittäviä kustannuksia. (14, s. 24–25.)

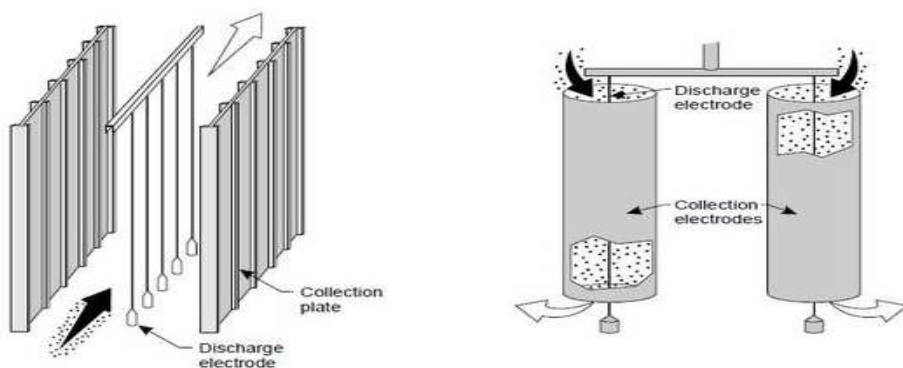
Kaupallisia kuitusuodatinlaitteistoja on tarjolla ainoastaan teolliseen mittakaavaan. Kehitystyötä pienpolttoon soveltuvien kuitusuodattimien kohdalla on kuitenkin tehty muun muassa Saksassa. (16, s. 13.)

## **4.2 Sähkösuodatin**

Sähkösuodattimessa savukaasujen pölyhiukkaset varataan sähkökentässä, minkä jälkeen ne erottuvat keräyselektrodeille, joilta ne poistetaan. Sähkösuodattimia on rakenteensa mukaan jaoteltuna levymäisiä ja putkimallisia. (19, s. 60; 20.)

Levymäisessä sähkösuodattimessa keräyselektrodeina toimivat levyt, joiden välistä savukaasut kulkevat. Putkimallisessa sähkösuodattimessa keräyselektrodina toimii sylinterinmuotoinen putki, jonka sisäpuolella savukaasut virtaavat. Pölypitoinen savukaasu johdetaan maadoitettujen keräyselektrodien ja jänniteyksikköön yhdistettyjen emissioelektrodien väliin. Levymäisessä sähkösuodattimessa on levyjen välissä useita emissioelektrodeja, kun taas putkimallisen suodattimen sisäpuolella on yksi putken keskilinjalla kulkeva emissioelektrodi. (Kuva 17.) (19, s. 60; 20.)





KUVA 17. Vasemmalla levymäinen sähkösuodatin ja oikealla putkimallinen sähkösuodatin (20)

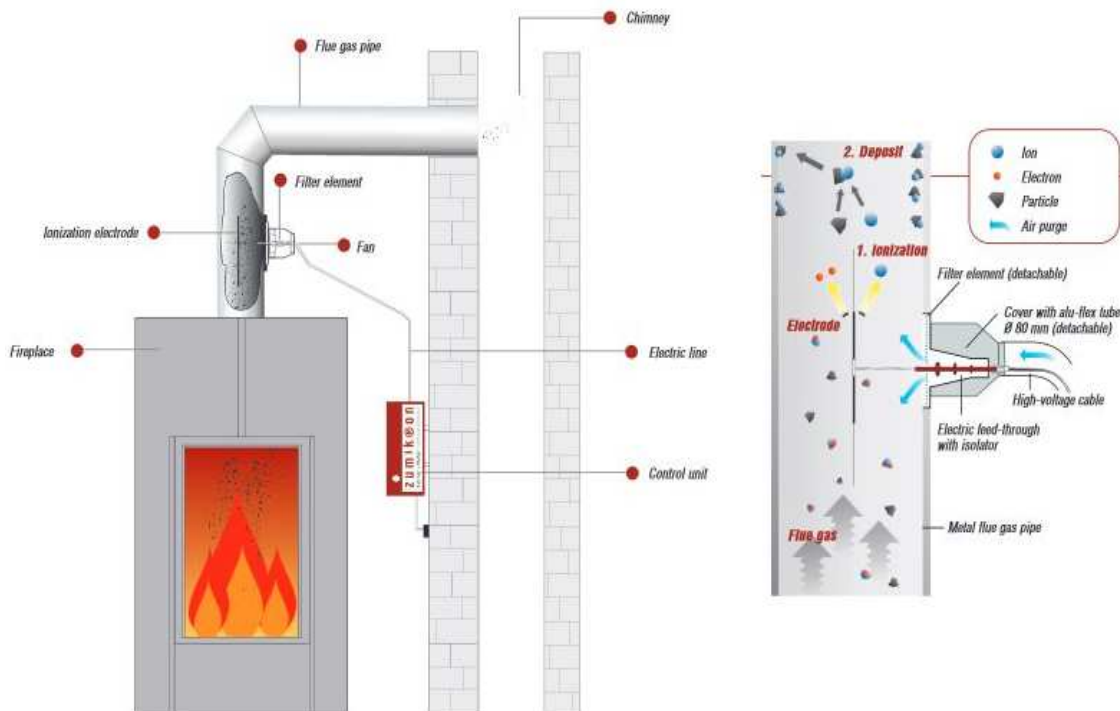
Emissioelektrodit varataan negatiivisella tasavirtajännitteellä. Emissioelektrodeilla syntyy niin sanottu koronapurkaus, jolloin negatiivisten elektronien irtoaminen synnyttää sähkövirran. Elektronit törmäävät kaasumolekyyleihin, jotka ionisoituvat ja puolestaan varaavat pölyhiukkaset negatiivisella varauksella. Tällöin pölyhiukkaset sähköisten voimien vaikutuksesta ajautuvat positiiviselle keräyselektrodille. Kiinnittyneet pölyhiukkaset poistetaan ravistamalla, vesihuuhtelulla tai mekaanisesti. (19, s. 60; 20.)

Sähkösuodatin on tällä hetkellä ylivoimaisesti eniten käytetty kiintoaineen erotuslaite suurissa voimalaitoksissa. Se on yleistynyt myös yhä pienemmissä kattilalaitoksissa. Syitä sähkösuodattimen suosioon ovat korkea erotusaste, pienet käyttö- ja kunnossapitokustannukset, pieni painehäviö, lämpötilankesto, luotettavuus, vähäinen huoltovaatimus, tukkeutumattomuus ja pitkä käyttöikä. Suurimpana haittapuolena on korkea investointikustannus, mikä korostuu varsinkin hyvin korkeilla erotusasteilla. (19, s. 59–60.)

Euroopassa puun pienpolttoon on tarjolla kaupallisia sähkösuodattimia ja useita laitteistoja on kehitteillä (16, s. 13; 21, s. 23–73). Kuvissa 18 ja 19 on esimerkkejä kaupallisista ratkaisuista. Molemmat laitteistot toimivat samalla periaatteella kuin putkimallinen sähkösuodatin.

Kuvassa 18 on pienpolttolaitteen ja savupiipun väliseen hormiin asennettava Zumik®on-sähkösuodatin, jonka on kehittänyt saksalainen Kutzner+Weber. Zumik®onia voidaan käyttää lähes kaikissa pienpolttolaitteissa, joiden teho on

enintään 40 kW. Sen suodatusteho on 50–90 %. Zumik®on on helposti kunnossapidettävä ja se puhdistetaan nuohouksen yhteydessä. Sähkösuodatin toimii automaattisesti ja sen käyttökustannukset ovat pienet. Laitteiston hinta on noin 1 500 €. (21, s. 34–42; 22, s. 3.)



KUVA 18. Zumik®on-sähkösuodatin (22, s. 2–3)

Kuvassa 19 on savupiipun huipulle asennettava OekoTube -sähkösuodatin, jonka on kehittänyt sveitsiläinen OekoSolve. OekoTube sopii kaikkiin pienpolttolaitteisiin, joiden teho on alle 40 kW. Sen suodatusteho on 95 %. OekoTube voidaan helposti asentaa kaikentyyppisiin savupiippuihin. Olemassa oleviin savupiippuihin ei tarvitse tehdä muutoksia. Kestävärakenteinen sähkösuodatin toimii automaattisesti ja se puhdistetaan nuohouksen yhteydessä. Laitteiston hinta on noin 1 600 - 2 000 €. (21, s. 42–45; 23, s. 1–2.)



*KUVA 19. OekoTube -sähkösuodatin (24; 25)*

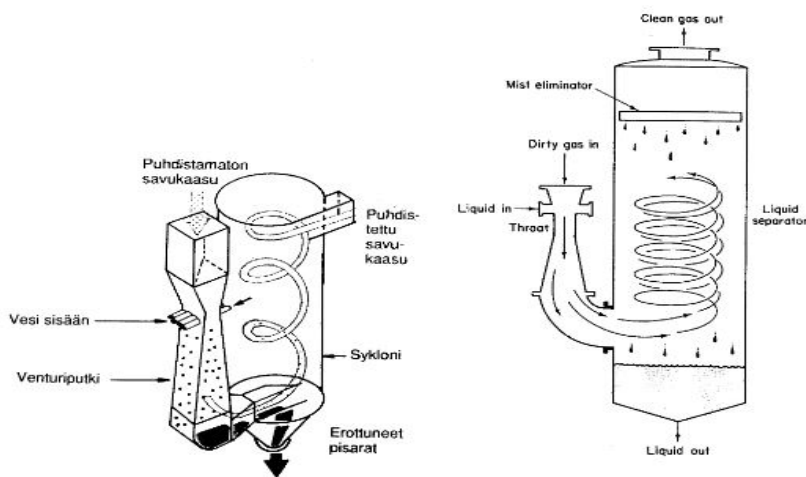
Suomessa puun pienpolttoon soveltuvaa sähkösuodatinta on työstänyt mikkeliäinen Tassu ESP Oy, jonka NASU-suodatin on vielä kehitysvaiheessa. NASU-suodattimen toimintaperiaate on hieman vastaavanlainen kuin putkimallisella sähkösuodattimella. Savupiipun sisäpuolelle ei tule keräimiä, lankoja tai vastaavia. Ionisoiva sähköpurkaus ei myöskään ole savukaasukanavassa vaan varatut ionit puhalletaan savupiippuun suurella nopeudella liikkuvan pienen ilmavirtauksen avulla. Ilmavirtauksen tuottamiseen vaaditaan pieni ilmakompressori. Savukaasun haitalliset pienhiukkaset varautuvat, jonka jälkeen ne kiinnittyvät savupiipun sisäpintaan. Hiukkaset saadaan poistettua normaalin nuohouksen mukana. Valmistaja pyrkii saamaan edullisen ja huoltovapaan tuotteen markkinoille, ennen kuin puun pienpolttoon suunnitellut EU-säädökset astuvat voimaan. (21, s. 63–65; 26; 27.)

### **4.3 Hiukkaspesuri**

Hiukkaspesureissa eli märkäpesureissa savukaasussa olevat hiukkaset tarttuvat nestepisaroihin ja jäävät pesurissa kiertävään nesteeseen. Neste hajotetaan pieniksi 0,1–1,0 mm:n pisaroiksi, jotta saataisiin tehokas kosketus pölyhiukkasten ja pisaroiden välille. Hiukkasten törmätessä vesipisaroihin hiukkaset huuhtoutuvat pois savukaasuvirrasta. Erotuskyky kasvaa, kun vesipisarat ovat pieniä ja niiden nopeus savukaasun hiukkasten nopeuteen verrattuna on suuri. Hiukkasten sidonta perustuu törmäykseen, suoraan pidätykseen ja pienillä hiukkasilla myös diffuusioon. (14, s. 26; 28, s. 49–51.)

Yleisimpiä märkäpesurityyppejä ovat pesutorni, syklonipesuri, törmäyspesuri ja venturipesuri. Tehokkain märkäpesurityyppi hiukkaserotuksen kannalta on venturipesuri. (28, s. 51–52.)

Venturipesurissa (kuva 20) savukaasu johdetaan venturiputkeen, jossa on suppilomainen kavennus. Kavennuksen kautta kulkiessaan savukaasun nopeus kasvaa merkittävästi. Venturiputken kapeimpaan kohtaan ruiskutetaan matalapaineista vettä. Vesi jakautuu sumuksi, jolloin saadaan hyvä kosketus savukaasun ja veden kesken. Tämän jälkeen putki laajenee, jolloin savukaasun nopeus hidastuu ja viipymäaika pesurissa pitenee. Vesipisaroihin törmänneet hiukkaset erottuvat savukaasuvirrasta pisananerottimessa pudoten pesurin pohjalle. Sieltä kiintoainepitoinen vesi pumpataan puhdistettavaksi ja edelleen takaisin kiertoon eli pesuriin ruiskutettavaksi. (28, s. 51–52.)



KUVA 20. Venturipesuri (28, s. 51)

Märkäpesureilla päästään noin 80–99 %:n erotusasteeseen. Pienin hyvin erotuva hiukkaskoko on alle 1  $\mu\text{m}$ . Haittoina ovat suuret painehäviöt ja kiintoainepitoinen jätevesi, joka vaatii tehokkaan puhdistusjärjestelmän. Lisäksi kustannuksia aiheuttavat pesunesteen kulutus ja pumppaaminen. Pesuri vaatii myös paljon tilaa. (14, s. 27.)

Puun pienpolttoon soveltuvia hiukkaspesureita ei ole tällä hetkellä markkinoilla. Saksalainen Schröder on kylläkin kehittänyt HydroCube-pesuria, joka on savukaasulämmönvaihtimen ja märkäpesurin yhdistelmä. (16, s. 13; 29, s. 5–11.)

#### 4.4 Sykloni

Syklonit (kuva 21) ovat yleisimpiä mekaanisia pölynerottimia. Niitä käytetään tavallisesti esierottimena ennen varsinaista suodatinta. Sykloneissa ei ole liikuvia osia, joten ne ovat halpoja, kestäviä, helppokäyttöisiä ja huoltovapaita. Pöly saadaan talteen kuivana. Syklonit hyödyntävät keskipakoisvoimaa saattamalla savukaasun pyörivään liikkeeseen. Pölypitoinen savukaasu johdetaan syklonin sisään joko tangentiaalisesti tai aksiaalisesti, ja se kulkee spiraalimaisesti syklonin pohjaa kohti. Tällöin pölyhiukkaset sinkoutuvat syklonin seiniä vasten ja kulkeutuvat alas syklonin pohjalle. Puhdistunut savukaasu imetään syklonin keskeltä pois. (14, s. 18–19; 30, s. 72.)



KUVA 21. Sykloni (14, s. 19)

Paras erotuskyky saadaan silloin, kun syklonin halkaisija mahdollisimman pieni. Erotuskykyyn vaikuttaa olennaisesti myös hiukkasten koko. Syklonit eivät erota tehokkaasti alle 5  $\mu\text{m}$ :n hiukkasia. Syklonin käyttömahdollisuudet ovat siten rajoitetut pienhiukkasten erottamiseksi. Syklonin erotusastetta voidaan nostaa kytkemällä rinnan useita pieniä sykloneja, jolloin saadaan niin sanottu multisykloni. Pienen syklonin halkaisijan takia multisykloneiden tukkeutumisriski on suuri. Syklonien kaupallisia ratkaisuja löytyy ainoastaan teollisen mittakaavan polttolaitteille. (14, s. 20; 16, s. 13; 30, s. 72–73.)

## 4.5 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihdin on laite, jossa lämpöä siirretään kahden fluidin välillä. Näitä fluideja voivat olla esimerkiksi savukaasu ja vesi. Lämmönvaihtimia käytetään yleisesti prosessitekniikassa, energiantuotannossa sekä jäähdytys- ja ilmastointilaitteissa. Energiantuotannossa niitä voidaan käyttää hukkalämmön talteenottoon savukaasuista, mikä nostaa laitoksen tai prosessin hyötysuhdetta. Pienpoltossa savukaasut ovat normaalisti suhteellisen kuumia. Jatkuvasyöttöisessä poltossa lämpötilat ovat keskimäärin 140–190 °C. Panospoltossa lämpötila on noin 210 °C. Saunan kiukaissa savukaasun lämpötila voi olla jopa 350 °C. Pienpoltossa hukkalämmön talteenottoa on sovellettu harvakseltaan. (31, s. 51.)

Pienhiukkasten kerrostuminen savukaasujärjestelmien yhteydessä oleviin lämmönvaihtimiin on tunnettu ilmiö. Tätä kerrostumista voidaan hyödyntää suhteellisen tehokkaasti hiukkasten keräämiseksi savukaasuista. Lämmönvaihtimen optimointi pienhiukkasten keräämiseen ja sen asentaminen pienpolttolaitteeseen mahdollistavat hukkalämmön talteenoton sekä pienhiukkaspäästöjen vähentämisen. (31, s. 51–52.)

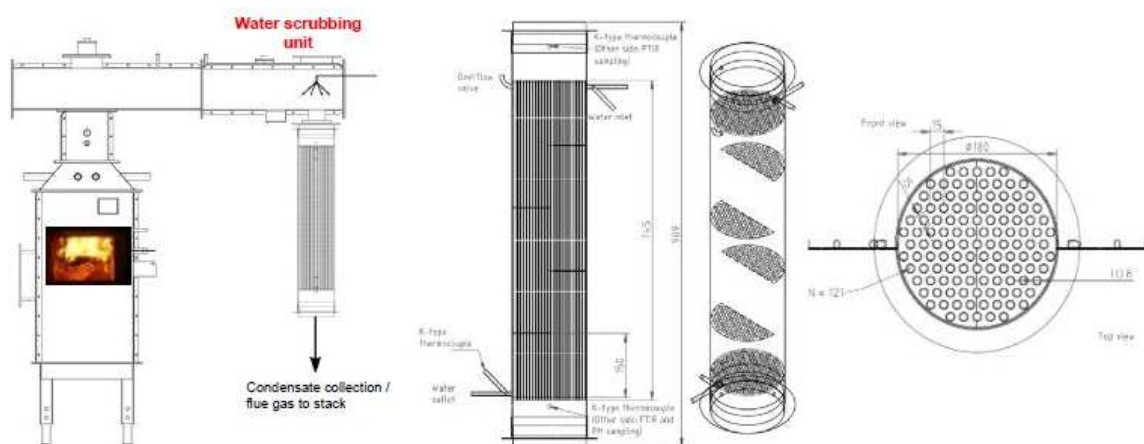
Itä-Suomen yliopistossa on ollut kehitteillä kondensoiva lämmönvaihdin (kuva 22) tehokkaaseen lämmön talteenottoon ja järkevään pienhiukkasten vähentämiseen. Kondensoiva lämmönvaihdin soveltuu jatkuvasyöttöiseen pienpolttoon kosteilla polttoaineilla. (32, s. 34.)



KUVA 22. Kondensoiva lämmönvaihdin (33, s. 30)

Kondensoivan lämmönvaihtimen toiminta perustuu korkeisiin lämpötilaeroihin savukaasun ja lämmönvaihtimen seinämien välillä, mikä pakottaa savukaasun hiukkaset seinämille lämpötilaerojen aiheuttamien voimien takia. Myös savukaasun sisältämän veden lauhtuminen lämmönvaihtimen pinnoille tehostuu. Veden lauhtumisen aiheuttamien lisävoimien ansiosta hiukkasten kerääntyminen lisääntyy. Lisäksi veden lauhtuminen vähentää lämmönvaihtimen likaantumista muodostamalla virtaavan vesikalvon lämmönvaihtimen pinnoille. Lämmönvaihtimen hyötysuhde nousee lauhtumisesta saatavan energian vuoksi. (32, s. 34.)

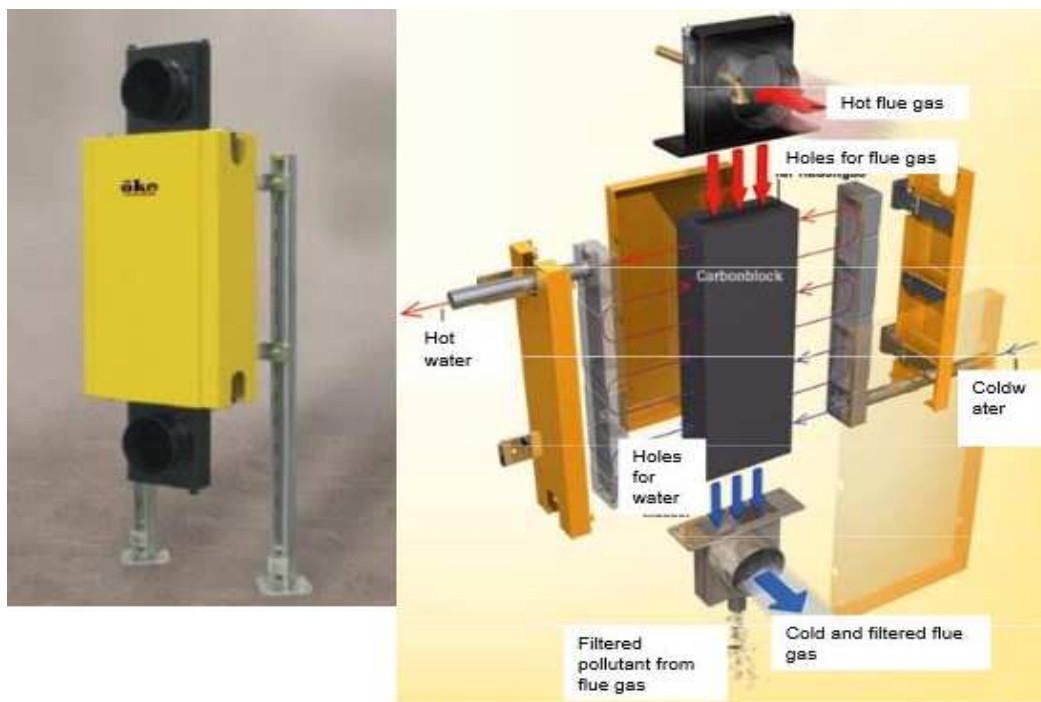
Kondensoiva vaippaputkilämmönvaihdin on tyypiltään pystysuora vastavirta-lämmönvaihdin, jonka sisällä on 121 pienempää putkea sisältävä pystysuuntainen putkinippu. Kuvan 23 mukaisessa esimerkissä savukaasut johdetaan putkinipussa oleviin putkiin ylhäältä alaspäin. Savukaasun tulolämpötila saa olla enintään 700 °C. Korkeammilla tulolämpötiloilla hiukkasten erottuminen olisi tehokkaampaa, mutta ongelmana ovat korkean lämpötilan korroosio ja materiaalikestävyys. Jäähdytys vedellä tapahtuu vastavirtaan eli alhaalta ylöspäin erillään savukaasuista. Lauhde virtaa kalvona alaspäin putkien sisäpinnoilla ja se poistuu lämmönvaihtimen alakautta. Lämmönvaihtimen yhteyteen on kehitetty myös pesuriyksikkö savukaasun sisääntuloaukon ja putkien seinämien puhtaanapitämiseksi. Suodatusteho tällä kondensoivalla lämmönvaihtimella on 25–40 % ja prototyyppivaiheessa hinnaksi on arvioitu noin 5 000 €. (21, s. 73–75; 32, s. 34–37.)



KUVA 23. Kondensoivan lämmönvaihtimen periaate (21, s. 73; 33, s. 31)



Saksalaisyritys Bschor on kehittänyt ja tuonut markkinoille kondensoivan lämmönvaihtimen, jonka nimi on Öko-Carbonizer (kuva 24). Se sisältää hyvin lämpöä johtavan ja kestävän hiilikappaleen, joka toimii lämmönvaihtimena. Polttolaitteelta tulevat savukaasut jäähtyvät lämmönvaihtimessa. Savukaasujen sisältämä vesihöyry lauhtuu vaihtimen sisäpinnoille vapauttaen lämpöenergiaa. Hiukkaset kiinnittyvät lauhteeseen, minkä ansiosta lämmönvaihdin pysyy puhtaana. (21, s. 76–79; 34, s. 1–8.)



KUVA 24. Öko-Carbonizer (21, s. 76; 34, s. 8)

Öko-Carbonizer soveltuu pääasiassa kattiloille, joiden teho on lämmönvaihtimen mallista riippuen enintään 22–400 kW. Lämmönvaihdin asennetaan savukaasuputkeen kattilan ja savupiipun väliin. Savupiipun pitää olla valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Jätevedet vaativat asianmukaisen hävittämisen. Lämmönvaihtimen suodatusteho riippuu savukaasussa olevan veden lauhtumisesta. Kosteat puupolttoaineet lisäävät lauhteen määrää lämmönvaihtimessa kasvattaen hieman suodatustehoa. Öko-Carbonizerin ensisijainen käyttötarkoitus on kattilan termisen hyötysuhteen nostaminen. Teholtaan alle 22 kW:n kattilaan soveltuvan lämmönvaihdinmallin hinta on noin 2 600 €. (21, s. 76–79; 34, s. 1–8; 35; 36.)



## 4.6 Katalysaattori

Puun pienpolttoon tarkoitettu katalysaattori on tavallisesti keraaminen ja rakenteeltaan kennomainen. Se on pinnoitettu jalometallilla, joka toimii katalyyttinä. Näitä jalometalleja ovat normaalisti palladium, rodium tai platina. Katalysaattori voi hapettaa savukaasujen sisältämät palamattomat kaasut korkeassa lämpötilassa ympäristölle haitattomiksi yhdisteiksi, kun se asennetaan sopivaan paikkaan polttolaitteen sisälle tai savunpoiston yhteyteen. Katalysaattori siis vaatii toimiakseen korkealämpötilaiset savukaasut, minkä vuoksi se ei ole käytettävissä sytytyksen aikana ja matalissa polttolämpötiloissa. Pienpolttolaitteisiin integroituja katalysaattoreita on käytössä erityisesti Pohjois-Amerikassa. Lisälaitteina asennettavia katalysaattoreita on käytössä vähemmän, mutta niitä on ollut kehitteillä ja myynnissä varsinkin Saksassa. (16, s. 13; 21, s. 100; 31, s. 69–70.)

Ruotsalainen Näl dens Värmeindustri AB valmistaa teräksisiä moduulisavupiippuja, joihin voidaan asentaa yhteensopiva NVI-piippukatalysaattori (kuva 25). Katalysaattorin verkkokennosto on valmistettu patentoidulla valmistustekniikalla. Verkkokennoston aktiivisina katalyytteinä toimivat jalometallit platina ja palladium, jotka hapettavat hiilimonoksidin hiilidioksidiksi ja palamattomat hiilivedyt hiilidioksidiksi sekä vedeksi. NVI-katalysaattorin kotelo on helppo avata ja sulkea. Kotelossa oleva kennosto tulee puhdistaa noin 40–60 tunnin aktiivisen käytön jälkeen, jotta katalyytit pysyvät aktiivisina. Savukaasut sisältävät myös metallioksideja, jotka tukkivat katalyytteinä toimivia jalometallihiukkasia. Tämän vuoksi kennoston puhdistuksessa käytetään heikkoa hapanta liuosta, kuten esimerkiksi laimennettua sitruunahappoa tai etikkaa. Itse katalyytit eivät kulu käytössä, joten kennoston säännöllinen puhdistus riittää. (37; 38, s. 6–7.)



KUVA 25. NVI-piippukatalysaattori (37; 38, s. 7)

## 5 PIENPOLTTOON SOVELTUVIMMAT HIUKKASSUODATTIMET

Pienpolttoon soveltuvien hiukkassuodattimien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat niiden halpuus, pieni koko, helppokäyttöisyys, kestävyys, luotettavuus, pieni painevastus, yksinkertainen rakenne, puhdistettavuus ja hyvä hiukkasten erotuskyky. Taulukossa 2 on havainnollistettu hiukkassuodattimien soveltuvuutta pienpolttoon. (16, s. 11–12; 39, s. 197.)

TAULUKKO 2. Hiukkassuodattimien soveltuvuus pienpolttoon (16, s. 11–12)

Laite	Hiukkaskoko (µm)	Suodatusteho kokonaispölylle (%)	Hyvät puolet	Huonot puolet
Kuitusuodatin	0.01 ... 100	99 ... 99.99	keräystehokkuus, yksinkertaisuus, ei korroosio ongelmia	huoltotiheys, huono kuumuuden ja kosteuden kesto, kipinöistä aiheutuva palovaara, suodatustehon riippuvuus virtausnopeudesta
Sähkösuodatin	0.01 ... 100	99 ... 99.99	keräystehokkuus, hyvä kuumuuden ja kosteuden kesto, pieni painevastus, suhteellisen matalat käyttökustannukset	korkeat investointi- ja kustannukset, suodatustehon riippuvuus hiukkaspitoisuudesta, suuri koko, korkean jännitteen ongelmat, huomaamaton tehokkuuden lasku
Hiukkaspesuri	0.5 ... 100	90 ... 99.9	suodattaa sekä hiukkasia että kaasuja, pieni huollon tarve, hyvä kuumuuden ja kosteuden kesto, neutraloi korroosiota aiheuttavia yhdisteitä	korroosio-ongelmat, jäteveden käsittely, suuri painevastus, huono keräysteho pienimmille hiukkasille, jäätymisriski
Sykloni	1 ... 100	50 ... 99	yksinkertaisuus, pieni huollon tarve, edullisuus, vakaa painevastus ja tehokkuus, pieni koko	huono keräysteho pienimmille hiukkasille, tukkeutumisriski, mahdollisesti äänekäs
Lämmönvaihdin	0.005 ... 0.05	25–95	hukkalämmön talteenotto, itsepuhdistuva	tehokkuuden riippuvuus palokaasun lämpötilasta ja kosteudesta, vasta kehitteillä
Katalysaattori	ei tietoa	ei tietoa	vähentää häkää ja orgaanisia yhdisteitä savukaasussa, vähentää orgaanisia hiukkasia, kaupallisia ratkaisuja tarjolla	suuri painevastus, ei tietoa hiukkasten suodatus- ja tehokkuudesta, uusittava n. 10000 tunnin käytön jälkeen

Pienpoltossa pienhiukkaspäästöjä syntyy eniten kokoluokassa 0,01–0,1 µm, joten Taulukon 2 osoittamien tietojen mukaan hiukkaspesurit ja syklonit soveltuvat huonosti näiden päästöjen vähentämiseen. Kuitusuodatin olisi keräystehonsa ja yksinkertaisuutensa puolesta hyvä ratkaisu, mutta sen huono kuumuuden kesto ja kipinöiden aiheuttama palovaara ovat vaikeita ongelmia. (16, s. 12.)

Pienpolttoon parhaiten soveltuvat hiukkassuodatustekniikat ovat sähkösuodattimet, lämmönvaihtimet ja katalysaattorit. Näissäkin tekniikoissa on omat ongelmansa, mutta niitä on kuitenkin jo markkinoilla ja kehitystyön alaisena. Katalysaattorien suuresta painevastuksesta ja lyhyestä käyttöiästä johtuva huono käytettävyys on rajoittanut niiden yleistymistä. Lisäksi katalysaattori ei toimi sytytyksen aikana ja matalissa lämpötiloissa. (16, s. 12; 39, s. 197.)

Sähkösuodattimet ja lämmönvaihtimet ovat kaksi lupaavinta pienpolton hiukkassuodatustekniikkaa, joista ominaisuuksiltaan potentiaalisimpia ovat kuitenkin tällä hetkellä sähkösuodattimet. Molempien hiukkassuodattimien käytön optimoinnille ongelmia aiheuttavat panospolton savukaasujen lämpötilan, kosteuden ja hiukkaspitoisuuden vaihtelut. Markkinoilla nykyisin olevat lämmönvaihtimet on tarkoitettu ensisijaisesti pienpolttolaitteiden termisen hyötysuhteen nostamiseen. (16, s. 12; 21, s. 1–2.)

## 6 YHTEENVETO

Työn päätarkoituksena oli selvittää soveltuvimmat hiukkassuodatustekniikat puun pienpolton pienhiukkaspäästöjen vähentämiseen omakotitalokokoluokassa. Työssä tutustuttiin puun pienpolttoon Suomessa, poltosta aiheutuviin pienhiukkaspäästöihin sekä hiukkassuodatustekniikoihin.

Melkein jokaisessa suomalaisessa pientalossa ja kesämökissä on jokin pienpolttolaitte. Pienpoltossa käytettävät puupolttoaineet ovat kotimaisia, uusiutuvia, hiilidioksidineutraaleja ja taloudellisia energialähteitä. Puupolttoaineiden käyttö tulee lisääntymään lähivuosina, koska Suomi on sitoutunut lisäämään uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetun energian osuutta. Tärkeimpiä pienpolttolaitteissa käytettäviä puupolttoaineita ovat halot, klapit, hake, puupelletit ja puubriketit. Pienpolttolaitteet voidaan jakaa panospolttolaitteisiin ja jatkuvatoimisiin polttolaitteisiin. Panospolttolaitteita ovat varaavat tulisijat, kiukaat, avotakat, kamiinat ja kattilat. Jatkuvatoimisia polttolaitteita ovat stokeripoltin ja pellettipoltin, jotka on kytketty kattilaan. Pellettipoltinta käytetään myös pellettitakoissa.

Pienpoltossa puu palaa tavallisesti epätäydellisesti, minkä vuoksi pienhiukkaspäästöt ovat korkeat. Pienhiukkaset aiheuttavat terveydelle haitallisia vaikutuksia ihmisten altistuessa niille. Vaarallisimpia ovat pienhiukkaset, joiden läpimitta on alle 1 µm. Ne pääsevät tunkeutumaan syvälle hengityselimistöön ja jopa verenkiertoon saakka. Erityyppisten pienpolttolaitteiden päästöt vaihtelevat suuresti. Käyttäjän virheillä voi olla polttolaitetta suurempi merkitys syntyvien päästöjen kannalta. Puun pienpoltto on suurin pienhiukkasten aiheuttaja Suomessa. Ecodesign-direktiivin pienpolttolaitteita koskevat vaatimukset tulevat olemaan ensimmäinen suomalaisen pienpolton pienhiukkaspäästöjä rajoittava laki.

Sekundäärisillä savukaasujen puhdistusmenetelmillä eli hiukkassuodatustekniikoilla voidaan vähentää ilmakehään joutuvia päästöjä polttolaitteen jälkeen. Hiukkassuodatustekniikoihin joudutaan turvautumaan, jos primäärisin menetelmien eli erilaisilla polttotekniikoilla ja polttotavoilla sekä polttoaineilla ei saada päästöjä vähennettyä vaaditulle tasolle. Työssä tarkasteltuja hiukkassuodatustekniikoita olivat kuitusuodatin, sähkösuodatin, hiukkaspesuri, sykloni, lämmön-

vaihdin ja katalysaattori. Pienpolttoon soveltuvien hiukkassuodattimien tärkeimpiä ominaisuuksia ovat niiden halpuus, pieni koko, helppokäyttöisyys, kestävyys, luotettavuus, pieni painevastus, yksinkertainen rakenne, puhdistettavuus ja hyvä hiukkasten erotuskyky. Hiukkassuodattimien asennettavuus vanhoihin pienpolttolaitteisiin on myös tärkeää.

Hiukkassuodatustekniikoista huonoiten pienpolton pienhiukkaspäästöjen vähentämiseen soveltuvat hiukkaspesurit, syklonit ja kuitusuodattimet. Hiukkaspesuriin ja syklonien suurin ongelma ovat pienimpien pienhiukkasten huono erotuskyky. Kuitusuodattimessa eniten ongelmia aiheuttavat huono kuumuuden kesto ja kipinöiden aiheuttama palovaara. Pienpolttoon parhaiten soveltuvat hiukkassuodatustekniikat ovat sähkösuodatin, lämmönvaihdin ja katalysaattori.

Markkinoilla olevat pienpolttoon tarkoitetut sähkösuodattimet toimivat samalla periaatteella kuin putkimalliset sähkösuodattimet. Pienhiukkasten keräämiseen optimoitu lämmönvaihdin ja sen asentaminen pienpolttolaitteen yhteyteen mahdollistavat hukkalämmön talteenoton sekä pienhiukkaspäästöjen vähentämisen. Sähkösuodattimelle ja lämmönvaihtimelle ongelmia aiheuttavat panospolton savukaasujen lämpötilan, kosteuden ja hiukkaspiteisyyden vaihtelut. Katalysaattorin avulla voidaan hapettaa savukaasujen sisältämät palamattomat kaasut korkeassa lämpötilassa ympäristölle haitattomiksi yhdisteiksi. Katalysaattori ei toimi sytytyksen aikana ja matalissa polttolämpötiloissa. Lisäksi katalysaattorit aiheuttavat suuren painevastuksen, jonka vaikutuksia voitaisiin kuitenkin vähentää esimerkiksi asentamalla savukaasuimuri savupiippuun.

Pienpolttolaitteisiin tarkoitettuja hiukkassuodattimia on jo runsaasti käytössä ulkomailla, mutta Suomessa niitä on hyödynnetty erittäin vähän. On vielä epäselvää, kuinka hiukkassuodattimet soveltuvat Suomen vaativiin olosuhteisiin. Hiukkassuodattimien käyttöönottoa rajoittavat niiden hinnat, jotka ovat vielä tällä hetkellä suhteellisen korkeat verrattuna uudella polttotekniikalla varustettuihin vähäpäästöisiin pienpolttolaitteisiin. Lisäksi pienpolton pienhiukkaspäästöjen tämänhetkinen sääntelemättömyys Suomessa ei edistä hiukkassuodattimien yleistymistä. Tilanne saattaa kuitenkin muuttua, kun puun pienpolttoon suunnitellut EU-säädökset astuvat voimaan lähitulevaisuudessa.

## LÄHTEET

1. Puun pienpolton päästö- ja toksisuustietokanta. 2015. Itä-Suomen yliopisto. Saatavissa: <http://wanda.uef.fi/pupo/info.html>. Hakupäivä 2.2.2015.
2. Tulevaisuuden tuotantoteknologiat -tutkimusryhmä. 2015. Oulun Eteläisen instituutti. Saatavissa: <http://www oulu.fi/fmt/FMT6/index.html>. Hakupäivä 2.2.2015.
3. Puun pienpolttoon koskevat terveydelliset ohjeet. Opas 6. 2008. Helsinki: Sosiaali- ja terveydenhuollon tuotevalvontakeskus. Saatavissa: [http://www.valvira.fi/files/ohjeet/Puun\\_poltto-opas.pdf](http://www.valvira.fi/files/ohjeet/Puun_poltto-opas.pdf). Hakupäivä 4.2.2015.
4. Maatilan hakelämmitysopas. 2008. Metsäkeskus. Saatavissa: [http://www.puulakeus.net/docs/109-TqY-Maatilan\\_hakelammitysopas\\_lopullinen.pdf](http://www.puulakeus.net/docs/109-TqY-Maatilan_hakelammitysopas_lopullinen.pdf). Hakupäivä 4.2.2015.
5. Puulämmitys kiinteistöissä. 2015. Motiva. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva\\_energia/bioenergia/puulammitys\\_kiinteistoissa](http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/puulammitys_kiinteistoissa). Hakupäivä 4.2.2015.
6. Biopolttaineet. 2015. Bioenergian Pikkujättiläinen - Bioenergianeuvoja. Saatavissa: <http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttaineet/>. Hakupäivä 4.2.2015.
7. Van Loo, Sjaak – Koppejan, Jaap 2007. The handbook of biomass combustion and co-firing. London: Earthscan.
8. Alakangas, Eija – Erkkilä, Ari – Oravainen, Heikki 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys. Polttopuun tuotanto ja käyttö. Jyväskylä: VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.pdf>. Hakupäivä 7.2.2015.
9. Keddy Superkasetti. 2013. Keddy. Saatavissa: <http://www.keddy.fi/assets/Uploads/keddysuperkasettiesite2013.pdf>. Hakupäivä 15.2.2015.

10. Savolahti, Mikko – Karvosenoja, Niko 2014. Ecodesign-direktiivi ja muita vähennyskeinoja puun pienpolton hiukkaspäästöille. Ilmansuojelu nro 4. S. 7–12. Saatavissa: [http://www.isy.fi/islehdet/IS\\_4\\_2014.pdf](http://www.isy.fi/islehdet/IS_4_2014.pdf). Hakupäivä 20.2.2015.
11. Lappalainen, Iiris 2007. Puupolttoaineiden pienkäyttö. Helsinki: Tekes. Saatavissa: <http://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/puupolttoaineet.pdf>. Hakupäivä 20.2.2015.
12. Paunu, Ville-Veikko 2012. Pientalojen puunpoltto aiheuttaa merkittävää altistumista pienhiukkasille. Ilmansuojelu nro 4. S. 7–9. Saatavissa: [http://www.isy.fi/islehdet/ISU4\\_2012.pdf](http://www.isy.fi/islehdet/ISU4_2012.pdf). Hakupäivä 25.2.2015.
13. Puunpoltto. 2015. Terveystieteiden tutkimuskeskus ja hyvinvoinnin laitos. Saatavissa: <https://www.thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/ilmansaasteet/puunpoltto>. Hakupäivä 25.2.2015.
14. Ohlström, Mikael – Tsupari, Eemeli – Lehtilä, Antti – Raunemaa, Taisto 2005. Pienhiukkas päästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa. Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen vaikutukset. VTT tiedotteita 2300. Espoo: VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2300.pdf>. Hakupäivä 2.3.2015.
15. Laitteiden vaatimustenmukaisuus. 2013. Tukes. Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Pelastustoimen-laitteet/Pelastustoimen-laitteiden-vaatimustenmukaisuus/>. Hakupäivä 8.3.2015.
16. Nuutinen, Kati – Karhunen, Tommi 2009. Pienpolton hiukkaspäästöt ja niiden vähentäminen. Kuopio: Northern Solutions Oy. Saatavissa: [http://www.kuopioinnovation.fi/uploads/aineistopankki/ymparistoteknologia\\_fi/Pienpolton\\_hiukkaspäästöt\\_ja\\_niiden\\_vähentäminen.pdf](http://www.kuopioinnovation.fi/uploads/aineistopankki/ymparistoteknologia_fi/Pienpolton_hiukkaspäästöt_ja_niiden_vähentäminen.pdf). Hakupäivä 12.3.2015.
17. Tissari, Jarkko 2008. Fine particle emissions from residential wood combustion. Kuopio University publications C. Natural and environmental sciences 237. Kuopio: University of Kuopio. Saatavissa:

- [http://epublications.uef.fi/pub/urn\\_isbn\\_978-951-27-1090-4/urn\\_isbn\\_978-951-27-1090-4.pdf](http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-951-27-1090-4/urn_isbn_978-951-27-1090-4.pdf). Hakupäivä 15.3.2015.
18. Huhtinen, Markku – Kettunen, Arto – Nurminen, Pasi – Pakkanen, Heikki 2000. Höyrykattilatekniikka. 5., uudistettu painos. Helsinki: Edita.
19. Jalovaara, Jukka – Aho, Juha – Hietamäki, Eljas – Hyytiä, Hille 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5–50 MW polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristö 649. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40560/SY\\_649.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40560/SY_649.pdf?sequence=1). Hakupäivä 21.3.2015.
20. Electrostatic precipitators information. 2015. GlopalSpec. Saatavissa: [http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing\\_process\\_equipment/air\\_quality/electrostatic\\_precipitators](http://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/air_quality/electrostatic_precipitators). Hakupäivä 21.3.2015.
21. Obernberger, Ingwald – Mandl, Christoph 2011. Survey on the present state of particle precipitation devices for residential biomass combustion with a nominal capacity up to 50 kW in IEA Bioenergy Task32 member countries. IEA Bioenergy Task32 report. Graz: Graz University of Technology, Institute for Process and Particle Engineering. Saatavissa: <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Filter-study-IEA-Dez-2011.pdf>. Hakupäivä 25.3.2015.
22. The particle separator KW Zumik®on. Product description. 2009. Kutzner+Weber. Saatavissa: [http://www.kutzner-weber.de/fileadmin/kw\\_images/EN/Brochure%20PA%20engl.%2008.2009.pdf](http://www.kutzner-weber.de/fileadmin/kw_images/EN/Brochure%20PA%20engl.%2008.2009.pdf). Hakupäivä 29.3.2015.
23. OekoTube – the micro-dust filter for your wood fire. Infolyer. 2012. OekoSolve. Saatavissa: [http://www.oekotube.ch/joomla/oekosolve/images/pdf/OT-S2\\_Infolyer\\_E\\_02-2012.pdf](http://www.oekotube.ch/joomla/oekosolve/images/pdf/OT-S2_Infolyer_E_02-2012.pdf). Hakupäivä 2.4.2015.



24. OekoTube – feinstaubfilter, partikelabscheider, rauchgasfilter. 2015. Schröder. Saatavissa: <http://www.schraeder.com/emissionsminderung/oekotube/>. Hakupäivä 2.4.2015.
25. OekoTube. Referenzanlagen. 2015. OekoSolve. Saatavissa: <http://www.oekotube.ch/joomla/oekosolve/index.php/en/videosbilder-176/referenzanlagen-oekotube>. Hakupäivä 2.4.2015.
26. Domestic Wood Combustion. 2010. Tassu ESP Oy. Saatavissa: <http://www.tassuesp.com/domestic-wood-combustion>. Hakupäivä 7.4.2015.
27. Kukkonen, Esko 2009. NASU – uusi suomalainen ratkaisu puunpolton pienhiukkasten suodatuksen. Hiukkasfoorumi 16.6.2009. Saatavissa: <http://hiukkasfoorumi.fi/?q=node/408>. Hakupäivä 7.4.2015.
28. Ohlström, Mikael 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. VTT tiedotteita 1934. Espoo: VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1934.pdf>. Hakupäivä 10.4.2015.
29. Neue Wege der Abgasreinigung und Wärmerückgewinnung von Kleinanlagen. Fachtagung Weg vom Öl – Die Zukunft dezentraler Wärmesysteme. 2007. Bad Sassendorf: Landwirtschaftszentrum Haus Düsse. Saatavissa: <http://www.duesse.de/znr/pdfs/2007/2007-01-25-weg-vom-oel-02.pdf>. Hakupäivä 12.4.2015.
30. Pihkala, Juhani 2013. Prosessitekniikka. Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. Helsinki: Opetushallitus.
31. Hytönen, Kati – Jokiniemi, Jorma 2007. Reduction of fine particle emissions from residential wood combustion. Kuopion yliopiston ympäristötieteen laitoksen monistesarja 3/2007. Kuopio: Kuopion yliopisto, ympäristötieteen laitos. Saatavissa: <https://www2.uef.fi/documents/1129563/1129576/PAVA+Final+Report.pdf/9413c09a-5059-40a9-94e1-98405df2a2ff>. Hakupäivä 15.4.2015.

32. Obernberger, Ingwald – Brunner, Thomas – Biedermann, Friedrich 2012. Future low emission biomass combustion systems. ERA-NET Bioenergy Project FutureBioTec final report. Graz: Graz University of Technology. Saatavissa:  
[http://pure.ltu.se/portal/files/41546195/FutureBioTec\\_FinalReport.pdf](http://pure.ltu.se/portal/files/41546195/FutureBioTec_FinalReport.pdf). Hakupäivä 17.4.2015.
33. Brunner, Thomas 2014. FutureBioTec – Future low emission biomass combustion systems. 10 years ERA-NET Bioenergy conference. Hanover: Bioenergy 2020+. Saatavissa:  
[http://www.eranetbioenergy.net/website/exec/download/Hanover\\_A5\\_project\\_FutureBioTec\\_Brunner.pdf?id=15727-6e65742e6572616e65742e46696c65&token=2hB3iDC8yi1RCxK3BM3QiU6cf7yvR8](http://www.eranetbioenergy.net/website/exec/download/Hanover_A5_project_FutureBioTec_Brunner.pdf?id=15727-6e65742e6572616e65742e46696c65&token=2hB3iDC8yi1RCxK3BM3QiU6cf7yvR8). Hakupäivä 19.4.2015.
34. Öko-Carbonizer. Web broschüre. 2015. Bschor. Saatavissa:  
<http://www.carbonizer.de/download/carbonizer-english.pdf>. Hakupäivä 22.4.2015.
35. Öko-Carbonizer. 2015. Heizerschwaben. Saatavissa:  
<http://www.heizerschwaben.de/oko-carbonizer.html>. Hakupäivä 22.4.2015.
36. Öko-Carbonizer produkt linie. 2015. Bschor. Saatavissa:  
<http://www.carbonizer.de/content.php?id=85>. Hakupäivä 22.4.2015.
37. NVI-piippukatalysaattori. 2015. NVI. Saatavissa:  
<http://www.nvi.se/vedkatalysator.html?language=fi>. Hakupäivä 25.4.2015.
38. NVI 2000 moduulisavupiiput. Esite. 2008. NVI. Saatavissa:  
<http://www.nvi.fi/ESITE2008.pdf>. Hakupäivä 25.4.2015.
39. Alakangas, Teija 2007. Puupolttoaineiden pientuotannon ja käytön panostusalue. Teknologia katsaus 208. Helsinki: Tekes. Saatavissa:  
[http://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/pienpuu\\_vuosikatsaus\\_2007.pdf](http://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/pienpuu_vuosikatsaus_2007.pdf). Hakupäivä 29.4.2015.

## LÄHTÖTIETOMUISTIO

Työn tiedot	Tekijä <sup>1</sup> Antti Visakova	Tilaaja <sup>2</sup> Oulun yliopisto / Oulun Eteläisen instituutti - Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) tutkimusryhmä
	Tilaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot <sup>3</sup> Kari Mäntyjärvi	
	Työn nimi <sup>4</sup> <b>Päästöjen vähentämistekniikat ja niiden sopivuus pienpolttolaitoksiin</b>	
	Työn kuvaus <sup>5</sup> Työssä tutkitaan savukaasun puhdistuslaitteiden soveltuvuutta omakotitalokokoluokan pienpolttolaitoksiin käymällä läpi aihealueen kirjallisuutta ja lehtiä sekä tekemällä internet tietohakuja.	
	Työn tavoitteet <sup>6</sup> Työn tavoitteena on selvittää eri lähteitä hyödyntäen ne tekniikat, joiden avulla voidaan vähentää pienpolttolaitosten polttoperaisten pienhiukkaspäästöjen määrää.	
	Tavoiteaikataulu <sup>7</sup> Kevät 2015	
Päiväys ja allekirjoitukset <sup>8</sup>		
<div> <div>27/11/2014 Oulu Tekijän allekirjoitus Antti Visakova</div> <div>27/11/2014 Oulu Tilaajan allekirjoitus Kari Mäntyjärvi</div> </div>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tekijän nimi, puhelinnumero ja sähköpostiosoite.</li> <li>2. Työn teettävän yrityksen virallinen nimi.</li> <li>3. Sen henkilön nimi ja yhteystiedot, joka yrityksessä valvoo työn suoritusta.</li> <li>4. Työn nimi voi olla tässä vaiheessa työnimi, jota myöhemmin tarkennetaan.</li> <li>5. Työ kuvataan lyhyesti. Siinä esitetään muun muassa työn tausta, lähtötilanne ja työssä ratkaistavat ongelmat.</li> <li>6. Esitetään lyhyesti ja selvästi työn tavoitteet.</li> <li>7. Esitetään projektin tavoiteaikataulu. Silloin, kun työllä on välitavoitteita, myös ne merkitään aikatauluun. Tavoiteaikataulun ja oppilaitoksen yleisaikataulun perusteella tekijä laatii oman aikataulunsa.</li> <li>8. Lähtötietomuiستio päivätään ja sen allekirjoittavat tekijä ja tilaajan yhdyshenkilö.</li> </ol>		